

ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

FARKLI KAFES YAPILARININ ÖRTÜK MODELLEME YÖNTEMİYLE TASARIMI VE YAPISAL TABANLI SINIFLANDIRILMASI

DESIGN AND STRUCTURAL-BASED CLASSIFICATION
OF DIFFERENT LATTICE STRUCTURES VIA IMPLICIT
MODELING METHOD

Yazarlar (Authors): Hamit Kenan 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kenan H.,
“Farklı Kafes Yapılarının Örtük Modelleme Yöntemiyle Tasarımı ve Yapısal Tabanlı
Sınıflandırılması” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 10(1): 192-209, (2026).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1872013

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

FARKLI KAFES YAPILARININ ÖRTÜK MODELLEME YÖNTEMİYLE TASARIMI VE YAPISAL TABANLI SINIFLANDIRILMASI

Hamit Kenan^a 

^aAntalya Bilim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: hamit.kenan@antalya.edu.tr

(Geliş/Received: 26.01.26; Düzeltme/Revised: 09.03.26; Kabul/Accepted: 15.03.26)

ÖZ

Bu çalışmada, nTop yazılımı içerisinde sunulan farklı kategorideki kafes yapılar sabit bir kontrol hacmi içerisine entegre edilerek parametrik olarak modellenmiş ve statik ile modal analizleri gerçekleştirilmiştir. nTop'un alan temsiline dayalı modelleme yaklaşımı sayesinde serbest geometriler yüksek doğrulukla oluşturulmuş ve analizler için yeniden kullanılabilir bir süreç geliştirilmiştir. Çalışmada, 23 farklı kafes modeli tasarlanmış ve her biri aynı koşullar altında analiz edilerek kütle, katı hacim oranı, rijitlik ve yer değiştirme davranışları açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kafes yapıların kütle, rijitlik ve titreşim özellikleri arasında önemli farklar ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu kapsamda çalışma, farklı kafes tiplerinin mühendislik uygulamalarında hafiflik, dayanıklılık ve dinamik performans açısından sunduğu avantajları genel hatlarıyla ortaya koymakta ve ön tasarım aşamasında araştırmacılar ile tasarımcılara yol göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kafes Yapılar, Örtük Model, Statik Analiz, Modal Analiz, Mekanik Performans.

DESIGN AND STRUCTURAL-BASED CLASSIFICATION OF DIFFERENT LATTICE STRUCTURES VIA IMPLICIT MODELING METHOD

ABSTRACT

In this study, lattice structures from different categories available in the nTop software were parametrically modeled by integrating them into a fixed control volume, and their static and modal analyses were performed. Thanks to nTop's field-based modeling approach, free-form geometries were generated with high accuracy, and a reusable workflow was developed for the analyses. A total of 23 different lattice models were designed and analyzed under identical conditions, and their mass, solid volume ratio, stiffness, and displacement behaviors were compared. The findings reveal significant differences among lattice structures in terms of mass, stiffness, and vibration characteristics. In this context, the study highlights the advantages of different lattice types in engineering applications with respect to lightweight design, durability, and dynamic performance, thereby providing guidance to researchers and designers during the preliminary design stage.

Keywords: Lattice Structures, Implicit Model, Static Analysis, Modal Analysis, Mechanical Performance.

1. GİRİŞ

Kafes yapılar; hafif olmaları, yüksek özgül dayanım ve rijitlik sunmaları, ayrıca ısıyı etkin şekilde dağıtabilmeleri sayesinde

mühendisliğin birçok alanında tercih edilen yapılar arasında yer almaktadır [1]. Bu yapılar, belirli bir hacmi doldurmak ya da bir yüzeye uyum sağlamak amacıyla tekrarlayan

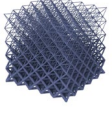

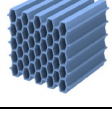
desenlerden meydana gelmektedir. Kendisini tekrarlayan ve kafes yapının en temel ögesi olarak adlandırılan desenlere ise birim hücre denilmektedir. Bu hücreler dikdörtgen, silindirik, küresel veya eğrisel olmak üzere farklı hücre haritalama yöntemleri kullanılarak yapıya entegre edilmektedirler [2]. Bu sayede kütle fazlalığı kaynaklı yapısal sorunlardan, uygun olmayan geometri kaynaklı termal sorunlara kadar birçok mühendislik problemine çözüm sunmaktadırlar. Sunulan bu çözümler gerek doğadan esinlenerek gerek sistematik olarak izlenen bir tasarım sürecinden elde edilerek bulunmaktadır [3-4]. Genel bir yaklaşımla üç ana başlıkta Şekil 1’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir. Çubuk tabanlı yapılar yüksek spesifik mukavemetleri nedeniyle yapısal uygulamalarda tercih edilirken [3]; TPMS yapıları pürüzsüz yüzey geçişleri sayesinde gerilme yığılmalarını azaltmakta ve yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde biyomedikal implantlar ile ısı transferi uygulamalarında üstün performans sergilemektedir [5-6]. 2.5 boyutlu bazlı yapılar ise tek yöndeki yüksek yük taşıma kapasiteleri ve hafiflikleri sayesinde özellikle sandviç panel çekirdek uygulamalarında ve ses yalıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Bu yapıların genel hatlarına bakarak; kafes yapıların yüksek gözeneklilik (yapı gerçek hacminin yapıyı oluşturan çerçeveye ait hacme oranı) oranı sunduğu, TPMS kafes yapıların simetrik olmaları sebebiyle her üç doğrultuda benzer mekanik özellikleri yüksek rijitlik ile gösterebilecekleri ve 2.5 boyutlu bazlı kafes yapıların belirli doğrultularda yüksek rijitlik sunabilecekleri çıkarımlarında bulunulabilmektedir. Bir probleme çözüm olacak kafes yapı tipinin seçimi ise problemin kendisi kadar zor bir süreç olabilmektedir. Zira kafes yapı tipinin seçimi genel itibarıyla şu kriterlere bağlıdır; uygulanacak yapının kullanım amacı (termal, mekanik, akustik vb.), malzemesi, geometrik karmaşıklığı, imal edilebilirliği, çalışma şartları. Bu sebeple seçim kriterleri her mühendislik problemi için farklı maddelerden oluşmakta ve sistematik yöntemler yerine sezgisel tasarım süreçleri ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda literatüre bakıldığında kafes yapılar üzerine çok farklı alanlarda, çok farklı yöntemler izlenerek çalışmalar yapılmış ve gelişen imalat yöntemleriyle daha karmaşık geometrilerin imal edilebilir olması sebebiyle bu alanda

birçok gelişmeler yaşanmıştır. Bu yapılar üzerine yapılan çalışmalar; üretim süreçleri, tasarım yaklaşımları, mekanik davranışlar ve uygulama alanlarını detaylı şekilde inceleyerek literatüre önemli katkılar sağlamaktadır [8]. Aşağıda kafes yapılar için yapılan çalışmaların genel hatlarıyla bir sınıflandırılması yapılarak literatür özeti sunulmuştur.

Literatür özeti kafes yapıların eklemeli imalat ile üretilmesi, mekanik performansları, enerji sönmülme kabiliyetleri, topoloji optimizasyonu, tasarım yöntemleri, çeşitleri olmak üzere belli alanlar kapsamında değerlendirilmiştir.

Thang vd. kafes yapı tasarımlarını eklemeli imalat kısıtlamalarını dikkate alarak gerçekleştirmiş ve önerdikleri yapının rijitliği artırırken gerilme ve yer değiştirmeleri azalttığını ifade etmişlerdir. Deneysel çalışmalarla beraber yürüttükleri ve yapay sinir ağları ile imal edilebilirlikleri optimize edilen kafes yapılar tasarlamışlardır [9]. Kumar vd. doğada bulunan denizkestanesi kabuğundan esinlenerek tasarlanan kapalı hücre kafes yapıyı, destek yapısı gerektirmeden üretilmiş ve bu kafes yapı tipinin açık hücre ile bal peteği yapıya kıyasla daha yüksek rijitlik, enerji soğurma ve yük taşıma kapasitesine sahip olabildiğini göstermiştir [10]. Nguyen ve Vignat, mevcut CAD yazılımlarının sınırlamalarını aşarak periyodik ve periyodik olmayan kafes yapılarının otomatik olarak modellenmesine imkân tanıyan yeni bir yöntem önermiştir. Ayrıca elektron ışını ergitme makinesi ile üretilen bir helisel dişli örneğini kullanarak ilgili yöntemi doğrulamış ve eklemeli imalat için tasarım sürecine önemli katkılar sağlamıştır [11]. Wang vd. eklemeli imalat için derecelendirilmiş kafes yapılarının tasarımına yönelik çok ölçekli bir optimizasyon yöntemi geliştirmiş ve çalışmalarında eklemeli imalat için global topoloji ile mezoyapı konfigürasyonları entegre edilmiştir [12]. Du vd. böcek kanadından esinlenerek tasarladıkları kafes yapıların, seçici lazer ergitme yöntemi ile imal edilebilirliklerine odaklanarak farklı işlem parametrelerinin yoğunlaşma, mikro yapı ve mekanik davranışlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Optimum parametrelerde elde edilen kafes yapıların, yüksek enerji soğurma kapasitesi ve yük taşıma performansı sergileyerek malzeme ve tasarım verimliliğini göstermişlerdir [13].

	<i>Model</i>	<i>Geometrik Karakteristik</i>
Çubuk Tabanlı 	Simple Cubic, BCC, FCC, Hexagonal, Octet, Kelvincell, Truncated Octahedron/Cube, Truss, Re-entrant, WP, Fluorite, Diamond	Birleşim noktalarında kesişen kirişlerden/çubuklardan oluşur.
Uygulama Alanları	Havacılıkta hafif panel dolguları, enerji emici yapılar, kaza bariyerleri	
Yüzey Tabanlı (TPMS) 	Gyroid, Diamond, Schwarz, Lidinoid, SplitP, Neovius, Simple Cubic Foam	Üç yönde periyodik, ortalama eğriliği sıfır olan sürekli yüzeylerden oluşur.
Uygulama Alanları	Isı eşanjörleri, kemik implantları (osteointegrasyon), kimyasal reaktörler	
2.5 Boyutlu Desen Tabanlı 	Triangular, Hexagonal, Re-entrant Honeycomb, Square Honeycomb Rotated	Tek yönde ekstrüzyon ile oluşturulan prizmatik yapılardan oluşur.
Uygulama Alanları	Sandviç panel çekirdekleri, ses yalıtımı, doğrusal yük taşıyıcılar	

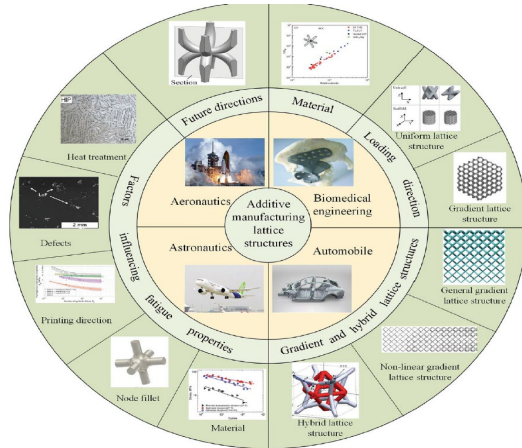
Şekil 1. nTop modelleme kütüphanesi temelinde kafes yapıların sınıflandırılması[2].

Şekil 1’te sunulan sınıflandırma, çalışmanın metodolojik odağını oluşturan nTop yazılımının tasarım kütüphanesi [2] ve analiz edilen hücre geometrileriyle sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda sunulan sınıflandırma yaklaşımı; birleşim noktalarında kesişen kiriş tabanlı kafesleri, üç yönde periyodik ve ortalama eğriliği sıfır olan sürekli yüzeyleri (TPMS) ve tek yönde ekstrüzyon ile oluşturulan prizmatik yapıları içerecek şekilde üç temel kategoriye dayandırılmıştır.

Liu, mekanik performanslarının incelenmesi için plak-kafes yapılar üzerine yaptığı çalışmada, teorik ve sonlu elemanlar analizlerine göre bu yapıların Young ve kayma modülleri açısından çubuk-kafeslere kıyasla 2–3 kat daha yüksek rijitlik gösterdiğini üstün mekanik özellikler sunduğu belirtilmiştir [14].

Liu vd. eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerine etki eden malzeme, yükleme yönü, gradyan ve hibrit topoloji gibi faktörlerin sistematik olarak incelendiği kapsamlı çalışmaları değerlendirmişlerdir. Bu sayede ilgili parametrelerin mekanik performansa etkisi konusunda genel bir görüş sunacak çıkarımlarda bulunmuşlardır [15]. Çalışmada ele alınan kriterler Şekil 2 ile görselleştirilmiştir.

Alkhatib vd. yaptıkları çalışmada lazer toz yatak füzyonu ile katmanlı imalat yöntemiyle imal edilen titanyum esaslı izotropik topoloji optimizasyonu yapılmış bir kafes yapının enerji sönmüleme kabiliyetini incelemişlerdir. Bu kapsamda, topoloji optimizasyonu yapılmış kafeslerin farklı yükleme yönlerinde neredeyse izotropik enerji sönmüleme özelliği sergileyerek geleneksel kafes tasarımlarına kıyasla daha güvenilir bir darbe dayanımı sunduğu sonucuna varmışlardır [16].



- Malzeme (Material)
- Yükleme Yönü (Loading Direction)
- Gradyan ve Hibrit Kafes Yapılar (Gradient and Hybrid Lattice Structures)
- Yorulma Özelliklerini Etkileyen Faktörler (Factors Influencing Fatigue Properties)
- Gelecek Yönler (Future Directions)

Şekil 2. Kafes yapı mekanik özelliklerine etki eden kriterler [15].

Yin vd. 200’den fazla çalışmayı inceleyerek yaptıkları geniş kapsamlı bir derleme ile kafes yapılar hakkında yakın zamana kadar yapılmış çalışmaların hangi tip kafes yapıları içerdikleri, hangi imalat yöntemlerinin kullanıldığını, tercih edilen kafes yapıları kullanım alanlarını detaylı olarak sunmuş ve sınıflandırmışlardır [17].

Derlemede özellikle enerji sönümleme üzerine çalışılan araştırmalar dikkate alınmıştır. Bu açıdan bakıldığında kafes yapıların enerji sönümleme konusunda ne derece önemli bir yapısal tercih olduğu anlaşılmaktadır. Kafes yapılar, farklı alanlardaki çok yönlü uygulamalarıyla öne çıkmaktadır. Günlük yaşamda bisiklet iskeleti tasarımlarında kullanıldığı görülmüştür [18]. Taşıt mühendisliği alanında, gelen ani yükleri sönümleyici darbe kutusu [19], yayalara çarpma durumunda olası zararların en aza indirmek için alternatif bir motor kaputu, zorlu yol koşullarında yuvarlanma direnci düşük bal peteği tipinde tekerlek [20] ve örnek bir aracın ön tarafında motor taşıyıcı gövdesi [21] gibi kritik yerler ve uygulamalar için tercih edilmiştir. Havacılık ve uzay mühendisliğinde, kafes çekirdekli kanat profili [22], roket gövdesinde titreşim azaltıcı kafes yapı [23] ve iniş aracının dışısında iki boyutlu kafes yapı [24] gibi örnekler de bulunmaktadır. Daha yüksek performans elde etmek amacıyla kafes yapıları kask astarı [25] ve farklı tip kafes yapı dolgulu sandviç paneller için [26,27] özel tasarımlar yapıldığı görülmüştür. Biyomedikal ve spor alanında ise implant [28] ve özetik tabanlı spor ayakkabı [29] uygulamaları, kafes yapıların çok yönlü kullanım potansiyelini göstermektedir.

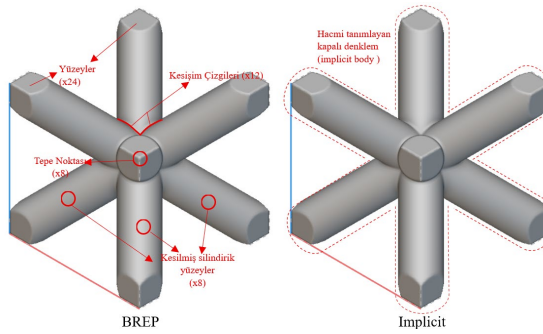
Yukarıda yalnızca çok küçük bir kısmı hakkında literatür bilgisi sunulabilen kafes yapıları gelişen ve gelişmeye devam eden imalat teknolojileri sayesinde gün geçtikçe daha da önem kazanmış ve sağlamış oldukları üstün özellikler sebebiyle her alanda araştırılmaya ve geliştirilmeye devam eden doğa temelli yapılarıdır. Kafes yapıları üzerine yapılan araştırmalarda; birim hücre boyutu, kontrol hacmi ve analiz girdilerindeki parametrik farklılıklar, literatür verilerinin doğrudan kıyaslanmasını zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak, literatürde farklı geometrik disiplinlerden gelen yapıların aynı tasarım platformunda, dinamik karakteristikleri üzerinden sistematik bir sınıflandırmaya tabi tutulması noktasında belirgin bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla farklı kafes modellerini özdeş geometrik kısıtlar ve yükleme koşulları altında inceleyerek; yapısal performans odaklı karşılaştırmalı bir değerlendirme ve sınıflandırma sunmayı hedeflemektedir. Mevcut çalışmalardan farklı olarak, farklı kafes

geometrisi aynı tasarım uzayında analiz edilerek; araştırmacılar için hafiflik ve rijitlik dengesini optimize etmeye yardımcı olacak bir karar-destek rehberi oluşturulması hedeflenmiştir. Bu yönüyle çalışma, ön tasarım aşamasında yapısal performans öngörüsü sağlayarak literatürdeki metodolojik bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışmada farklı desenler nTop programı yardımıyla parametrik olarak tasarlanmış, statik ve modal analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre sınıflandırılmıştır. Böylece ön tasarım aşamasında kafes yapı tercihinde bulunacak araştırmacılara çeşitli kriterlere göre tercihte bulunma imkânı sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmanın ilk aşamasında nTop programı ile tasarım ve analiz süreçleri detaylı olarak açıklanmıştır. Daha sonra analiz sonuçları tablo ve grafikler halinde sunulmuştur. Son olarak ise aşağıda belirtilen kriterlere göre sınıflandırma yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. KAFES YAPILAR, TASARIM VE ANALİZ SÜREÇLERİ

Çalışmada kullanılan kafes yapıları aşağıda Çizelge 1’de sunulmuştur. Tablodaki yapılar nTop programı tarafından hazır olarak kullanıma sunulmuş, en çok bilinen temel kafes tipleridir. İlgili programın en önemli özelliği voksel ve alan temelli modelleme yöntemini benimsemesidir. Bu sayede geleneksel katı modelleme yazılımlarının katı veya yüzey tabanlı modelleme yaklaşımlarının karmaşık kafes yapı tasarımında eksik kaldığı özellikler giderilip tasarımların birbirine bağlı fonksiyonel bloklardan kurulması sağlanarak parametrik bir tasarım süreci oluşturulmuştur. Bu sayede serbest geometriler yüksek doğrulukla oluşturulabilir ve parametrelerde yapılan değişiklikler modelin otomatik olarak güncellenmesine olanak sağlamaktadır. nTop programında yapılan işlem esasen belirli bir parça üretmekten ziyade, herhangi bir parçaya uygulanabilecek bir süreç geliştirmektir. Bu yaklaşım sayesinde oluşturulan tasarımlar kolaylıkla yeniden kullanılabilir ve otomatikleştirilebilir. Bunun temel nedeni, nTop’un geometriyi temsil etme biçimidir. Geleneksel yöntem olan sınır temsili (B-Rep) yaklaşımında katı modeller, yüzeylerin kenarlarla birleştirilmesiyle oluşturulurken; nTop farklı bir yöntem benimsemektedir. Program, aynı hacmi matematiksel denklemler aracılığıyla tanımlamaktadır. Bu yöntem,

geometri verilerinin çok daha hafif bir şekilde işlenmesini sağlar. Sadece denklemlerle çalışıldığından, dosya boyutunu artırmadan son derece karmaşık yapılar hızlı bir şekilde üretilebilmektedir. Program, bu hacim tanımlayıcı denklemleri arka planda saklamakta ve verilen giriş parametrelerine göre hesaplama yaparak ekranda görsel bir temsili oluşturmaktadır. Bu görsel temsil “implicit body” yani örtük gövde olarak adlandırılır ve nTop’un özgün formatıdır. Her örtük gövde, ilgili denklemleri görselleştirmeye imkân veren bir örtük alan (implicit field) ile ilişkilidir. Şekil 3’de Brep ve implicit farkları görseller ile açıklanmıştır.


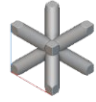
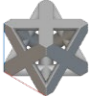

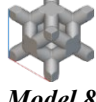





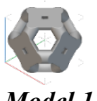

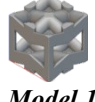
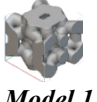

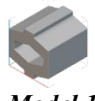

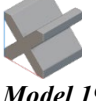




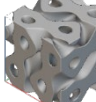
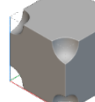
Şekil 3. BRep ve implicit farkları.

2.1. Kontrol Hacmi ve Tasarım Süreci

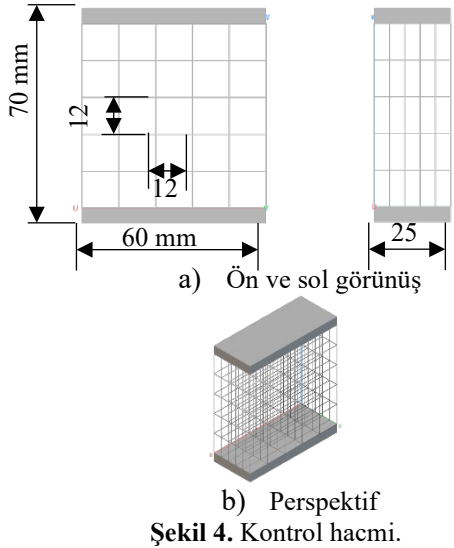
Belli bir kontrol hacminin referans alınarak nTop programının kütüphanesinde bulunan Çizelge 1’deki kafes tipleri arasında ortak bir zeminde karşılaştırmaların yapılabilmesi amacıyla Şekil 4’de görülebildiği gibi ölçüler belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında kafes yapıların analiz ve testlerinde kullanılan geometrilerin genellikle sezgisel yöntemlerle belirlendiği görülmüştür.

Çizelge 1. Kafes yapı tipleri.

<i>Model 1</i>	<i>Model 2</i>	<i>Model 3</i>
Simple Cubic	Body Centered Cubic	Face Centered Cubic
		
<i>Model 4</i> Diamond	<i>Model 5</i> Fluorite	<i>Model 6</i> Octet
		
<i>Model 7</i> Truncated Cube	<i>Model 8</i> Truncated Octahedron	<i>Model 9</i> Kelvin Cell

		
<i>Model 10</i> Iso Truss	<i>Model 11</i> Re-entrant (3D)	<i>Model 12</i> Weaire Phelan
		
<i>Model 13</i> Triangular Honeycomb	<i>Model 14</i> Hexagonal Honeycomb	<i>Model 15</i> Re-entrant Honeycomb
		
<i>Model 16</i> Square Honeycomb Rotated	<i>Model 17</i> Simple Cubic Foam	<i>Model 18</i> Gyroid
		
<i>Model 19</i> Schwarz	<i>Model 20</i> Diamond	<i>Model 21</i> Lidinoid
		
<i>Model 22</i> SplitP	<i>Model 23</i> Neovius	
		

Bununla birlikte, belirlenen kontrol hacimlerinin laboratuvar ortamındaki test koşullarına, kafes yapının malzemesine bağlı olarak imal edilebilirliğe uygun olmasına özen gösterildiği anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında kontrol hacmi ölçülerindense kafes yapıyı temsil eden birim hücrenin yatay ve düşey doğrultudaki tekrar sayılarının önemli olduğu görülmektedir. Kafes yapının her iki doğrultuda da aynı katılık özelliğine sahip olması yapılacak analiz ve testlerin tutarlı sonuçlar vermesi adına önemlidir. Bu kapsamda önerildiği üzere yatay ve düşey doğrultuda 5x5 birim hücre olacak şekilde bir kontrol hacmi tasarlanmıştır [30]. Aynı zamanda tablodaki kafes tiplerinin ileride deneysel çalışmalarda kullanılabilmesi, zaman ve maliyet anlamında tasarruf sağlanması amacıyla Şekil 4a’daki ölçülerde karar kılınmıştır.



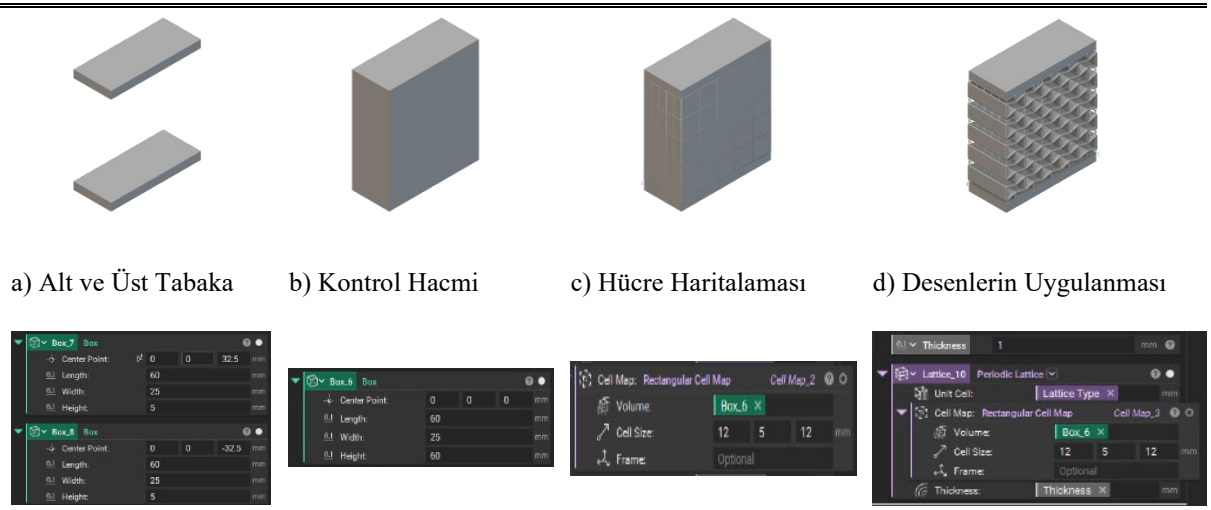
Şekil 4. Kontrol hacmi.

Daha önce nTop programındaki tasarım sürecinin birbirine bağlı blokların fonksiyonel olarak birbirlerine bağlı olması üzerine olduğu belirtilmişti. Bu sayede tasarımı oluşturan her unsur ayrı bir parametre olarak tanımlanabilmekte ve gerekli durumlarda yapılacak değişiklikler kolaylıkla ve sorunsuz bir şekilde yapıya uygulanabilmektedir. Aşağıda kısaca nTop programında kontrol hacminin tasarımı hakkında bilgi verilmiştir. Kontrol hacminin basma testlerinde kullanılabilmesi adına 5 mm kalınlığında alt ve üst tabaka tasarlanarak kafes yapı için 60 mm'lik bir yükseklik değeri belirlenmiştir. Tabakalar arasında kalan alanda tekrar eden hücrelerin parametrik olarak uygulanabilmesine olanak sağlayan hücre haritalaması için

60x60x25 mm ölçülerinde bir kutu eklenmiştir. Daha sonra bu kutu kullanılarak 5x5 adedinde tekrar eden hücre planlaması için 12x12x5 mm ölçülerinde haritalama yapılmıştır. Son olarak hücelere desen atanması için Çizelge 1'deki kafes tipleri ayrı ayrı seçilerek kullanıcı tarafından belirlenen et kalınlığı ile desenler kontrol hacmine atanmıştır. Bu çalışmada et kalınlığı değeri 1 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Programın tasarım akış süreci gereği mevcut durumda üç farklı örtük gövde oluşmuştur. Yapının analizlerde kullanılabilmesi adına tüm örtük yapılar bir gövde olarak şekilde "boolean union" kutusu ile birleştirilmiş ve tek bir örtük yapı elde edilmiştir.

Sadece teorik olarak yürütülen bu çalışmada, ileride yapılacak deneysel çalışmalar da düşünülerek yapı malzemesi olarak PLA tercih edilmiştir. Polilaktik Asit (PLA), bitkisel kaynaklardan üretilen, doğada çözünebilen bir plastik türüdür ve 3B yazıcılarda en çok kullanılan malzemelerden biridir.

PLA malzemesine ait mekanik özellikler aşağıdaki Çizelge 2'de sunulmuştur. Bu özellikler PLA malzemeden imal edilen standart çekme numunelerinin çekme testlerinden alınan değerler olmakla birlikte çekme numunelerinin imalat şartlarına göre farklı değerlerin de çıkabileceği literatürdeki farklı çalışmalarda değerlerden görülebilmektedir. Bu çalışmada Çizelge 2'deki değerler kullanılmıştır.



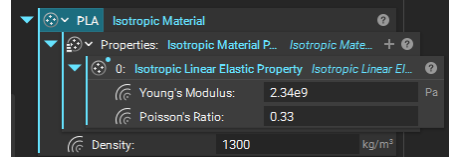
Şekil 5. Kontrol hacmi ve kafes tasarımı süreci.

nTop programında “isotropic material” kutusu kullanılarak malzeme bilgileri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Şekil 6). Bu malzeme bilgisi daha sonra analizler için kullanılan kutularda bir parametre girdisi olarak kullanılarak yapı ile ilişkilendirilmiştir. Malzeme özelliğine ve geometrik özelliklerine göre her modelin ağırlık ve hacim bilgileri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 3’de sunulmuş ve Şekil 7’de görsel olarak karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3’de kütle ve hacim değerleri yanında kafes yapı kullanımı sebebiyle gözenekli yapı tipine dönüşen gövdenin çeşitli kaynaklarda gözeneklilik, doluluk veya katı hacim oranı olarak tanımlanan parametresi de katı hacim oranı ismiyle verilmiştir.

Çizelge 2. PLA malzemesine ait mekanik özellikler.

Yoğunluk (kg/m^3)	1300
Elastik Modülü (Pa)	$2,34 \times 10^9$
Poisson oranı	0.33
Hacimsel Modül (Pa)	$2,29 \times 10^9$
Kayma Modülü (Pa)	$8,79 \times 10^8$
Akma Dayanımı (Pa)	$4,19 \times 10^7$
Maksimum Çekme Dayanımı (Pa)	$5,95 \times 10^7$



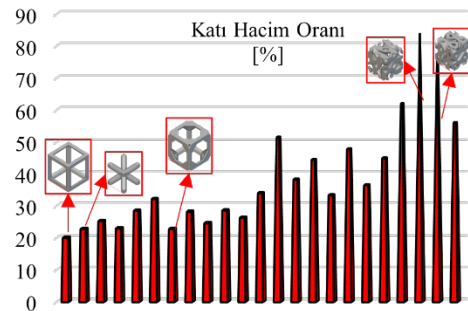
Şekil 6. nTop izometrik malzeme kutusu.

Çizelge 3. Modellerin kütle, hacim ve katı hacim oranı (KHO) değerleri.

Model No	Kütle [g]	Hacim [mm^3]	KHO [%]
Simple Cubic	25,15	19351	20
Body Centered Cubic	28,64	22037,8	23
Face Centered Cubic	31,73	24410,7	25
Diamond	28,87	22209,3	23
Fluorite	35,84	27576,5	29
Octet	40,43	31101,4	32
Truncated Cube	28,64	22032,8	23
T. Octahedron	35,43	27259,9	28
Kelvin Cell	30,92	23789,4	25
Iso Truss	35,94	27652,2	29
Re-entrant	33,10	25465,7	26
Weaire Phelan	42,75	32888,5	34
Triangular Honeycomb	64,60	49693,2	51
Hexagonal Honeycomb	48,06	36973,1	38
Re-entrant Honeycomb	55,75	42888,8	44
Square Honeycomb	41,91	32240,9	33
Simple Cubic Foam	59,96	46130,4	48
Gyroid	45,83	35261,2	36
Schwarz	56,45	43426,7	45
Diamond	77,84	59877,3	62
Lidinoid	105,61	81240,6	84
SplitP	94,71	72860,6	75
Neovius	70,35	54118,3	56
Kontrol Hacmi [mm^3]		96746	

2.2. Statik ve Modal Analizler

Bu kısımda statik ve modal analiz süreçleri hakkında kısaca bilgi verilmiş ve nTop programı aracılığı ile nasıl yapılabildikleri açıklanmıştır. nTop programı yapıları matematiksel olarak tanımlayıp formüller yardımıyla verileri depoladığından tasarlanan yapıların analizlerinin yapılabilmesi için belirli şekillerde ve hacimde elemanlar ile yeniden tanımlanmaları gerekmektedir.



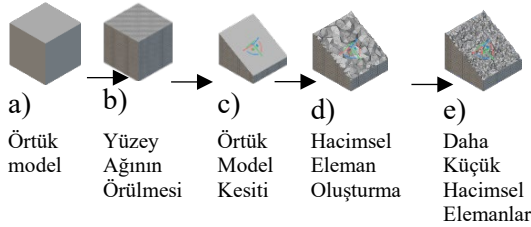
Şekil 7. Katı hacim oranları.

Yani, ilgili yapıların rijitlik [K] ve kütle matrisleri [M] bilinen ve hesaplanabilen küçük parçalara bölünmesi ve yeniden tanımlanması gerekmektedir. Bu sayede hareket denklemi oluşturulabilen yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerinin yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Bir sistemin hareket denklemi Denklem (1) 'de gösterilmiştir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

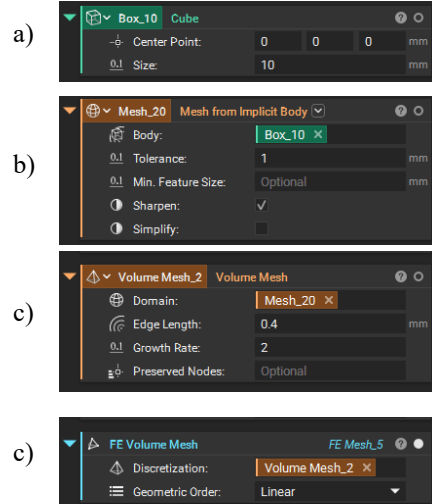
nTop programında örtük yapıdan katı modele geçiş için izlenmesi gereken yol aşağıdaki akış diyagramında örnek bir model üzerinden açıklanmıştır (Şekil 8, Şekil 9).

Şekil 8a'da küp şeklinde oluşturulan örtük model görülmektedir. Bu modelin verisi program tarafından alan temsiline dayalı yaklaşım ile depolanmakta ve ekranda yalnızca temsili olarak görselleştirilmektedir. İlk aşamada bu örtük modele ait yüzeyler kullanıcı tarafından belirlenen bir tolerans değerine göre (Şekil 8b, Şekil 9b) iki boyutlu üçgenler ile küçük parçalara bölünür. Bu işlem yalnızca yüzeyler içindir.



Şekil 8. Örnek model ile örtük modelin katı modele dönüşümü.

Modelin kesiti alınıp içine bakıldığında (Şekil 8c) herhangi bir eleman görülmemektedir. Yüzeylerle sınırlanan iç yapının da elemanlara ayrılması için “volume mesh” kutusu (Şekil 9c) kullanılarak kenar uzunluk değeri (edge length) girilir ve Şekil 8d'deki gibi hacimsel elemanlar oluşturulur. Şekil 8e ise daha küçük kenar uzunluk değeri ile elde edilen iç yapıyı göstermektedir. Bu değer en uygun eleman boyutunun bulunmasında kullanılmaktadır. Son olarak “FE Volume Mesh” kutusu (Şekil 9d) ile oluşturulan elemanların davranış şekilleri tercih edilir. Bu nokta iki seçenek mevcuttur; lineer ve ikinci dereceden.



Şekil 9. Örtük modelin katı modele dönüşümünde kullanılan ntop kutuları.

Bu aşamadan sonra sınır koşullarının ve yapıya etki eden dış yüklerin tanımlanması ile Denklem (2) yardımıyla statik analiz yapılarak yapıda meydana gelen yer değiştirme ve buna bağlı olarak yapının yer değiştirme karakteristiği, gerinim ve gerilme değerleri elde edilmiş olur.

$$kx = f(t) \quad (2)$$

Modal analiz, sisteme uygulanan yüklerden bağımsız olarak, sistemin dinamik özellikleri ve bu özelliklere bağlı tepkisinin incelendiği bir yöntemdir. Her mod, kendine özgü frekans, sönüm oranı ve karakteristik şekil değişimiyle tanımlanır. Bu şekil değişimi fiziksel olarak doğrudan gözlenemez; ancak sistemin ilgili modda nasıl deformasyon göstereceğini ortaya koyar. Modal analiz, yapının karakteristik özelliklerini belirler; ancak bu özelliklerin değerlendirilmesi için yapı ve çalışma koşullarına bağlı tasarım kriterlerine ihtiyaç vardır [31]. Modal analizin matematiksel temeli, serbest titreşim probleminin çözümüne dayanır[32]. Serbest titreşim, dış bir dinamik etki olmaksızın gerçekleşen hareketin yapıda sönümün ihmal durum için ele alınmasına dayanmaktadır. Bu nedenle yapıya ait hareket denklemi (denklem (1)) yapılan kabullerden sonra denklem (3) halini alır.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3)$$

Bu denklemin çözülmesi sonucunda ise w_n ile ifade edilen açısız doğal frekans değerleri elde edilmiş olur (denklem (5)).

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Yapıların dinamik karakteristiğini belirleyen doğal frekanslar ve mod şekilleri, mühendislikte her geometri için ayırt edici birer 'parmak izi' niteliğindedir; bu çalışma kapsamında söz konusu dinamik özellikler, serbest titreşim denklemlerinin matris formu kullanılarak hesaplanmıştır [33].

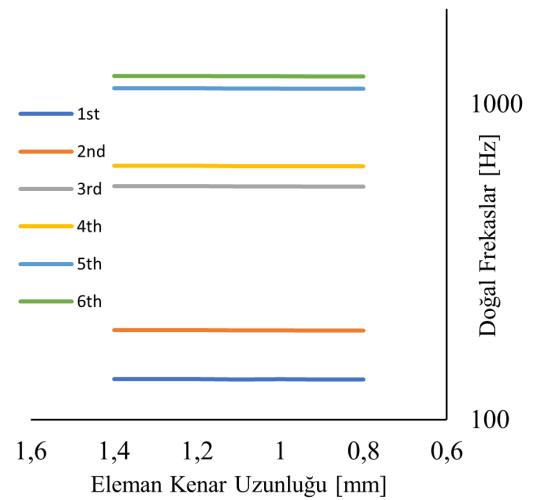
2.2.1. Modellere ait statik ve modal analiz süreçleri

Çizelge 1'de belirtilen kafes tipleri için ayrı ayrı statik analizler aşağıda Şekil 11, Şekil 12 ile gösterilen süreçler izlenerek yapılmıştır. Kafes yapılar için et kalınlık değerleri aynı olduğundan her biri için aynı eleman boyutları kullanılarak katı model oluşturulmuştur. Analizlerde alt plaka sabitlenip, üst plaka yüzeyinden aşağı yönde 500 N'luk bir kuvvet uygulanmıştır. Bu yük değerinin seçiminde iki temel kriter gözetilmiştir: Birincisi, çalışılan tüm kafes tiplerinin karmaşık geometrilerine rağmen gerilme yığılmalarının lineer-elastik sınırlar içerisinde kalması ve böylece plastik deformasyon etkilerinden arındırılmış bir rijitlik kıyaslaması yapılabilmesidir. İkincisi ise, farklı doluluk oranlarına sahip modellerin tamamında nümerik gürültüden uzak, anlamlı ve ölçülebilir bir sehim (yer değiştirme) verisi elde edilmesidir. Analizlerde kullanılan sınır koşulları, kafes yapıların literatürdeki deneysel basma testi standartlarıyla paralellik gösterecek şekilde tanımlanmıştır. Alt yüzeyin sabitlenip üst yüzeye yük uygulanması senaryosu, numunenin iki tabla arasında basma kuvvetine maruz kaldığı mühendislik durumlarını temsil etmekte olup; bu yöntem, farklı kafes geometrilerinin yapısal performanslarının kıyaslanmasında standart bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir.

Bu sayede modellerin rijitlik farklarının net bir şekilde kıyaslanabilmesi hedeflenmiştir. Buna göre yer değiştirme değerleri, yer değiştirme davranışı, alt tabanda meydana gelen reaksiyon kuvvetinin yüzey dağılımı gibi çıktılar elde edilmiştir. Bu çıktılar gerek görseller ile gerek sayısal veriler ile aşağıdaki kısımda sunulmuştur.

Modal analizde ise yapı yukarıda da bahsedildiği üzere herhangi bir yüklemeye maruz bırakılmadan serbest titreşim yaptığı varsayılarak denklem (3)'ün çözümüne yönelik analize tabi tutulur. Bunun sonucunda yapıya ait doğal frekanslar ve bu doğal frekanslarla ilişkili mod şekilleri elde edilir. Bu çalışmada yalnızca ilk 6 mod için çözümleme yapılmıştır. Kütle katılım faktörlerinin ilk 6 modda yoğunlaşması ve dinamik cevaplarda kütle katılım faktörü yüksek olan frekansların yapının tümünü temsil etmesi sebebiyle bu mod aralığına odaklanılmıştır.

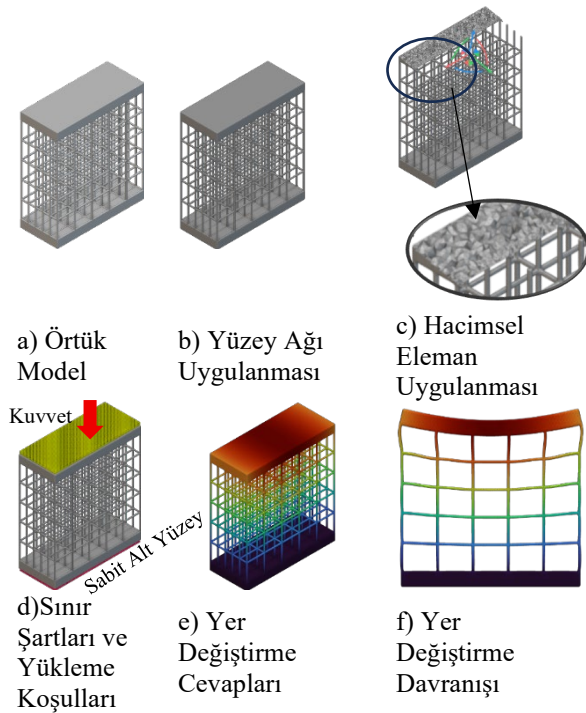
Sayısal analizlerin doğruluğunu ve mesh bağımsızlığını teyit etmek amacıyla, ince yapı unsurları içeren Model 2 (BCC) referans alınarak bir yakınsama analizi yürütülmüştür. Yapıların mekanik karakteristiğini yansıtan ve her bir geometri için 'parmak izi' niteliği taşıyan doğal frekans değerleri, mesh yoğunluğunun uygunluğunu denetlemek için temel kriter olarak belirlenmiştir. 1.4 mm ile 0.8 mm aralığında farklı mesh boyutları ile gerçekleştirilen modal analizlerde, sonuçların 1.0 mm eşiğinden itibaren kararlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 10). Bu doğrultuda; hem çözüm hassasiyetini en üst düzeyde tutan hem de karmaşık geometrilerdeki gerilme gradyanlarını ve mod şekillerini başarıyla yakalayan 0.8 mm mesh boyutu tüm modeller için standart parametre olarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan lineer eleman tipi, mesh yoğunluğunun bu optimum seviyede tutulmasıyla birleşerek yapısal davranışın yüksek bir doğrulukla ve gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesine olanak tanımıştır.



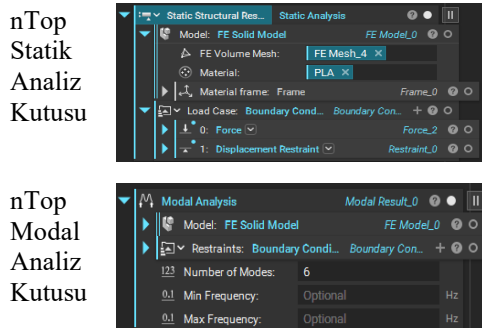
Şekil 10. Yakınsama Analizi

3. MODAL VE STATİK ANALİZ SONUÇLARI

Çalışmada incelenen 23 kafes model, geometrik açıdan ana çerçeve kapsamında benzer yapılar göstermesine rağmen, kütle, hacim ve katı hacim oranlarındaki farklılıklar nedeniyle her modelin dinamik davranışı ve mekanik özellikleri kendine özgüdür. Bu nedenle modal analizden elde edilen mod şekilleri genel olarak benzerdir; ancak her modelin kendine özgü doğal frekansları bulunmaktadır. Bu nedenle doğal frekanslar tabloya her model için ayrı ayrı eklenmiş ve sadece farklı mod şekillerini temsil eden örnekler, farklı kafes yapılarına ait modellerden seçilerek sunulmuştur.



Şekil 11. Statik analiz adımları ve nTop statik analiz kutusu



Şekil 12. Statik ve modal analiz için nTop kutuları

Çizelge 3'te sunulan kütle ve hacim verileri, modeller arasındaki fiziksel farklılıkları net bir şekilde ortaya koymaktadır. Örneğin, Simple

Cubic ve Body Centered Cubic gibi daha basit yapılar düşük kütle ($\approx 25-30$ g) ve katı hacim oranına (%20-23) sahipken, Lidinoid, Diamond ve SplitP gibi karmaşık geometriler yüksek kütle ($\approx 95-105$ g) ve katı hacim oranı (%75-84) ile öne çıkmaktadır. Katı hacim oranı, modelin kontrol hacmi içerisindeki katı malzeme miktarını ifade etmekte olup, yapının rijitliğini, dayanıklılığını, ağırlığını ve titreşim davranışını doğrudan etkilemektedir. Her kafes tipinin ilk altı modunu temsil eden tanımlar da Çizelge 4'te yer almakta olup, bu tanımlar modların yapısal davranış üzerindeki etkilerini yorumlamada rehber niteliğindedir.

Modal analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 13), modellerin ilk altı mod frekansları ile kütle ve katı hacim oranları arasında açık bir ilişki olduğu görülmektedir. Düşük kütle ve katı hacim oranına sahip modeller (Model 1, 4, 7, 11, 14 ve 15) ilk mod frekansları 100-200 Hz aralığında olup, yapının daha esnek ve deformasyona yatkın olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, yüksek kütle ve katı hacim oranına sahip modeller (Model 17, 18, 19, 20, 21, 22 ve 23) çok daha yüksek mod frekanslarına sahiptir; bazı modellerde bu değerler 4000 Hz'in üzerine çıkmakta ve yapı daha rijit, stabil ve dayanıklı bir davranış sergilemektedir.

Genel itibarıyla, düşük kütle ve katı hacim oranına sahip modeller esnek ve hafif yapılar sunarken, yüksek kütle ve katı hacim oranına sahip modeller rijit ve dayanıklı davranış sergilemektedir. Bu bulgular, kafes yapılarının tasarımında, özellikle ağırlık, rijitlik ve titreşim performansının optimize edilmesi açısından önemli bir rehber sağlamaktadır. Modal analiz sonuçları ve fiziksel parametrelerin bir arada değerlendirilmesi, farklı kafes tiplerinin karşılaştırmalı analizini mümkün kılmakta ve tasarım aşamasında alınacak kararlara dayanak oluşturmaktadır.

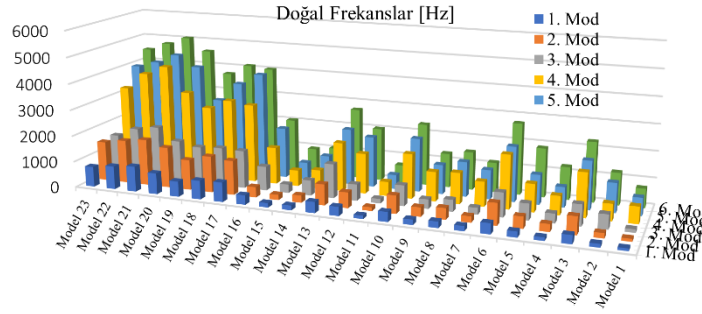
İncelenen 23 kafes modelin mod şekilleri Şekil 14'de sunulmuştur. Mod şekilleri, modellerin geometrik olarak benzer yapılar göstermesi nedeniyle genel olarak birbirine benzese de, kütle ve katı hacim oranlarındaki farklılıklar her modelin dinamik davranışında özgün etkiler yaratmaktadır. Çizelge 5'de her modelin ilk altı modunun tipleri belirtilmiş olup, bu modlar farklı hareket türlerini temsil etmektedir: eğilme, burulma, uzama ve öteleme. İlk modlar

genellikle Eğilme (X) ve Eğilme (Y) şeklindedir. Bu modlar, yapının üst kısmının x ve y eksenleri doğrultusunda yer değiştirmesi ile oluşur ve yapının temel esnekliğini yansıtır. Örneğin, Model 1 ve Model 2 için ilk iki mod X

ve Y yönünde eğilme olarak gözlenmiştir, bu da yapıların düşük kütle ve katı hacim oranına sahip olmasından dolayı temel olarak esnek davranış sergilediklerini göstermektedir.

Çizelge 4. Mod tanımları ve açıklamaları

Mod Tanımı	Açıklaması
1.Eğilme (X)	Yapı üst kısımdan x ekseninde olacak şekilde yer değiştirerek eğilmektedir.
1.Eğilme (Y)	Yapı üst kısımdan y ekseninde olacak şekilde yer değiştirerek eğilmektedir.
1.Burulma	Yapı tam ortasından geçen ve z eksenine paralel olan bir eksen etrafında üst kısımdan başlamak üzere burulmaktadır.
Uzama (Z)	Yapı z ekseninde üst kısımdan başlamak üzere uzamaktadır.
2.Eğilme (X)	Yapı üst kısımda y eksenine paralel bir eksen etrafında orta kısımdan x ekseninde yer değiştirecek şekilde eğilmektedir.
2.Eğilme (Y)	Yapı üst kısımda x eksenine paralel bir eksen etrafında orta kısımdan y ekseninde yer değiştirecek şekilde eğilmektedir.
2.Burulma	Yapı tam ortasından geçen ve z eksenine paralel olan bir eksen etrafında orta kısımdan başlamak üzere burulmaktadır.
Öteleme (X)	Yapı alt ve üst kısımları sabit kalarak orta kısımdan x ekseninde öteleme yapmaktadır.
Öteleme (Y)	Yapı alt ve üst kısımları sabit kalarak orta kısımdan y ekseninde öteleme yapmaktadır.

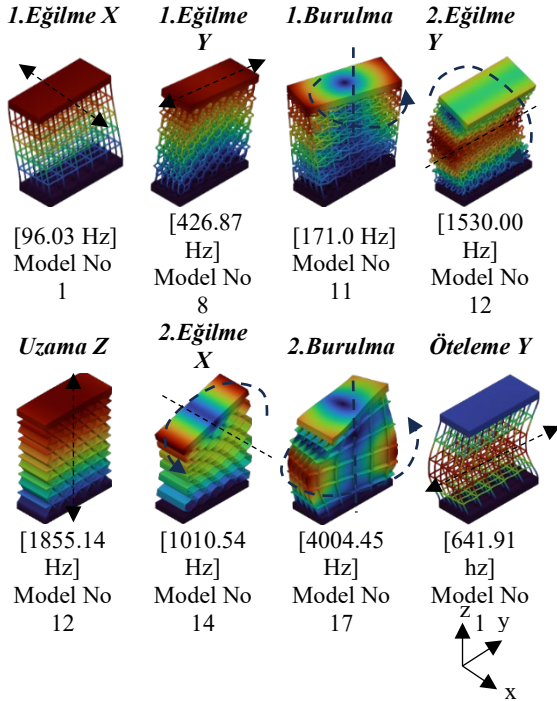


Şekil 13. Doğal frekanslar

Çizelge 5. Mod şekilleri

	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	6.Mod
Model 1	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	Öteleme X	Öteleme Y
Model 2	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	Öteleme X	Öteleme Y
Model 3	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	2.Eğilme Y	2. Eğilme X
Model 4	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	2.Eğilme Y	2. Eğilme X
Model 5	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	2.Eğilme X	2. Eğilme Y
Model 6	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Öteleme X	Uzama	2.Eğilme X
Model 7	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	2.Eğilme X	2.Burulma
Model 8	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 9	Eğilme X	1.Burulma	Eğilme Y	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 10	Eğilme X	1.Burulma	Eğilme Y	2.Eğilme Y	Uzama	2.Burulma
Model 11	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	2.Eğilme X	2.Burulma
Model 12	Eğilme X	1.Burulma	Eğilme Y	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 13	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	2.Eğilme Y	2.Eğilme X
Model 14	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	Uzama	2.Eğilme X	2.Eğilme Y
Model 15	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme X	Uzama	2.Eğilme Y
Model 16	Eğilme X	Eğilme Y	Uzama	1.Burulma	2.Eğilme Y	2.Eğilme X
Model 17	Eğilme X	1.Burulma	Eğilme Y	2.Eğilme Y	2.Burulma	Uzama
Model 18	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 19	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 20	Eğilme X	1.Burulma	Eğilme Y	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 21	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 22	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X
Model 23	Eğilme X	Eğilme Y	1.Burulma	2.Eğilme Y	Uzama	2.Eğilme X

Üçüncü mod genellikle 1.Burulma modudur. Bu mod, yapının z eksenine paralel bir eksen etrafında üst kısımdan başlayarak burulmasını temsil eder. Burulma modları, yapının torsiyonel rijitliğini değerlendirmek için önemlidir ve özellikle yapının orta kısmındaki gerilmelerin dağılımını anlamada kullanılır. Örneğin, Model 3 ve Model 4'te üçüncü mod burulma olarak gözlemlenmiş, bu da orta ve üst kısımdaki torsiyonel davranışın belirgin olduğunu göstermektedir. Dördüncü modlar genellikle Uzama (Z) veya Öteleme (X/Y) modlarıdır. Uzama modları, yapının z ekseninde yukarı doğru uzamasını temsil eder ve yapının aksel rijitliğini gösterir. Öteleme modları ise yapının alt ve üst kısımları sabit kalacak şekilde orta kısımdan x veya y ekseninde yer değiştirmesini ifade eder. Bu modlar, özellikle kafes yapının yatay düzlemlerdeki esnekliğini ve yer değiştirme davranışını anlamak için önemlidir. Örneğin, Model 6'da dördüncü mod öteleme X olarak gözlenmiş, bu durum yapının orta kısmında yatay yer değiştirme davranışının belirgin olduğunu göstermektedir.



Şekil 14. Mod şekilleri ve doğal frekans değerleri

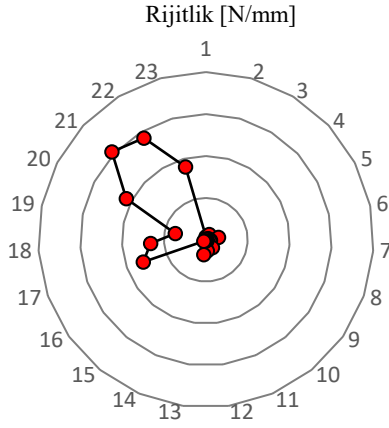
Beşinci ve altıncı modlar, genellikle ikinci derece eğilme ve ikinci derece burulma modlarıdır (2.Eğilme X/Y, 2.Burulma). Bu modlar, yapının orta kısmında başlayarak x veya y ekseninde eğilme ve z eksenine paralel

eksen etrafında burulma hareketlerini temsil eder. Bu modlar, yapının daha yüksek enerjili titreşimlerini ve karmaşık deformasyon davranışlarını ortaya koymaktadır. Örneğin, Model 7 ve Model 8'de beşinci mod 2.Eğilme Y, altıncı mod ise 2.Eğilme X olarak gözlemlenmiştir; bu da orta ve üst kısımdaki daha karmaşık eğilme davranışlarını göstermektedir. Genel olarak, tüm modellerin mod şekilleri benzer karakteristikler göstermektedir; eğilme modları düşük mod frekansları ile ilişkilidir ve yapının temel esnekliğini yansıtmaktadır. Burulma ve uzama/öteleme modları ise yapının torsiyonel ve aksel rijitliğini ortaya koyar ve genellikle daha yüksek mod frekansları ile gözlemlenir. Mod şekillerindeki bu çeşitlilik, modellerin kütle ve katı hacim oranlarındaki farklılıklar nedeniyle her birinin kendine özgü doğal frekanslar göstermesiyle uyumludur.

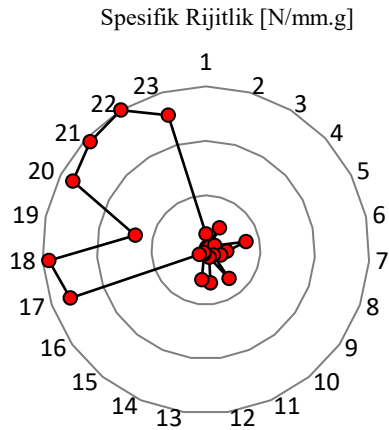
Bu bilgiler, kafes yapıların tasarımında hangi modların yapının belirli bölgelerinde daha belirgin olduğunu anlamak, titreşim davranışını tahmin etmek ve rijitlik optimizasyonu yapmak açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle, ikinci derece eğilme ve burulma modlarının orta kısımdaki deformasyonları temsil etmesi, yapısal tasarım kararlarında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

Statik analiz sonuçlarına bakıldığında (Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17); incelenen 23 farklı kafes yapısının mekanik performansı sadece mutlak çıktılar üzerinden değil, yapısal verimliliği ortaya koyan spesifik rijitlik, hacimsel verimlilik indeksi ve toplam deformasyon eğilimi gibi türetilmiş parametreler üzerinden bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Hafifliğin temel bir tasarım kısıtı olduğu mühendislik uygulamalarında mutlak rijitlik değerleri yanıltıcı olabildiğinden, yapıların birim kütle başına sunduğu direnci standardize eden spesifik rijitlik parametresi ile farklı doluluk oranlarına sahip geometrilerin malzeme kullanım verimlilikleri doğrudan kıyaslanabilir hale getirilmiştir. Rijitliğin kütle artışından mı yoksa bir hücre mimarisinden mi kaynaklandığını nicel olarak ayırt etmek amacıyla kullanılan hacimsel verimlilik indeksi sayesinde, yapının kapladığı toplam hacim içindeki doluluk oranı da değerlendirmeye dahil edilmiştir. Ayrıca yapının yük altındaki kararlılığını ve yükü hacmi boyunca dağıtma kabiliyetini temsil eden toplam deformasyon

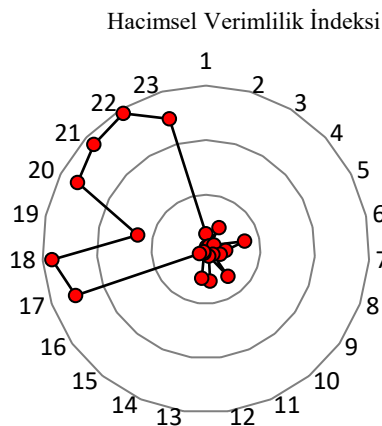
eğilimi kriteriyle, tasarımcılara yapının yerel zayıflıkları ve genel yapısal rijitliği hakkında kritik bir performans göstergesi sunulmuştur. Söz konusu parametrelere ait karşılaştırmalı çıktılar ve performans dağılımları Şekil 15'de detaylı olarak görülebilmektedir.



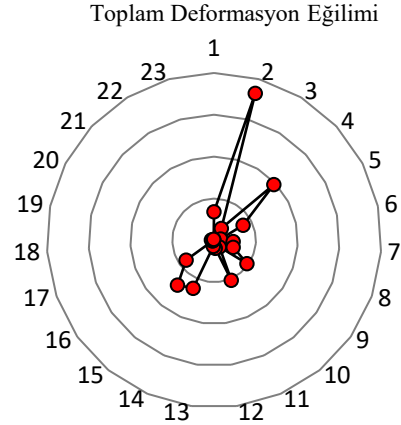
a) Rijitlik katsayısı



b) Spesifik rijitlik değeri



c) Hacimsel verimlilik değeri

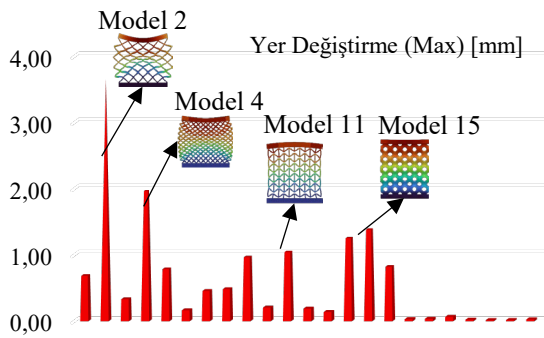
d) Toplam deformasyon eğilimi
Şekil 15. Performans Kriterleri

Yapılan analizlerde, yüzey tabanlı (TPMS) geometrilerin hem rijitlik hem de dinamik kararlılık açısından en üst segmentte yer aldığı görülmektedir. Özellikle Model 21 (Lidinoïd) ve Model 22 (SplitP), 300 N/mm.g civarındaki spesifik rijitlik değerleriyle kütle verimliliği açısından diğer modellerden keskin bir şekilde ayrılmaktadır. Model 22, Model 21'e kıyasla daha düşük bir katı hacim oranına (%75) sahip olmasına rağmen, ulaştığı yüksek hacimsel verimlilik indeksi (2.91×10^5) ile tasarımın geometrik üstünlüğünü kanıtlamaktadır. Bu gruptaki modeller (Model 17, 18, 20, 21, 22, 23), minimal yer değiştirme ve en düşük toplam deformasyon eğilimi değerlerini sergileyerek, hassas mühendislik uygulamaları için en kararlı çözümler olarak öne çıkmaktadır. Kiriş ve hibrit yapılardan oluşan ikinci grupta ise; Model 6 (Octet), Model 10 (Iso Truss) ve Model 12 (Weaire Phelan) gibi yapılar, orta düzeyde kütle kullanımı ile dengeli bir rijitlik sunmaktadır. Bu modellerin spesifik rijitlik değerleri (yaklaşık 60-75 N/mm.g), saf kiriş tabanlı modellere kıyasla anlamlı derecede yüksektir. Bu grup, yapısal performans ile hafiflik arasında optimum bir geçiş bölgesi oluşturarak, genel amaçlı mühendislik parçaları için ideal bir "tasarım aralığı" sunmaktadır. Buna karşın, düşük kütleli ve düşük katı hacim oranına sahip modellerde (örn. Model 1, 5, 7) rijitliğin sınırlı kaldığı görülmektedir. Özellikle Model 2 (BCC), 4.78 N/mm.g ile en düşük spesifik rijitlik ve 1830 Nmm ile en yüksek deformasyon eğilimi değerlerini sergileyerek, ana taşıyıcı eleman olmaktan ziyade yüksek deformasyon kapasitesi gerektiren sönümleme uygulamalarına daha uygun bir profil çizmiştir.

İncelenen modeller arasında özel bir yere sahip olan Model 11 (Re-entrant), tek başına özkütük davranış sergilemiş ve negatif poisson oranı karakteristiğiyle yük altında yanlardan içe doğru sıkışma tepkisi vermiştir. Bu özel mekanik davranış, yapının enerji emilimi ve şok dayanımı açısından literatürdeki avantajlarını destekler niteliktedir[34-37]. Model 11'in rijitlik değerleri orta-düşük seviyede kalsa da sunduğu kontrollü deformasyon karakteri onu özel performans gereksinimi duyan tasarımlar için özgün bir çözüm haline getirmektedir.

İncelenen modellerin sabit yük altında göstermiş tepki kuvvetlerine ait davranışlar Şekil 18'de gösterilmiştir. Görseller modellerin analizde sabitlenen alt yüzeylerini göstermektedir. nTop programından alınan sonuçlar tüm yüzeye ait sonlu elemanlar referans alınarak sunulduğundan mutlak bir tepki kuvveti yerine tepki kuvveti dağılımı olarak görseller hazırlanmıştır. Her modele ait maksimum ve minimum tepki kuvveti değerleri ilgili model görsellerinin altında verilmiş olmasına rağmen bu değerleri tek başlarına yorumlamak doğru sonuçlar vermeyebilir.

Çünkü, sonlu elemanlar yaklaşımı ile yapılan analizlerde kullanılan eleman tipi veya eleman sayısının gerçek olmayan ve sanki gerilme yığılması oluşmuş gibi sanal gerilme değerleri verebildiği bilinmektedir. Çalışmanın amacı sonlu elemanlar modeli oluşturmak ve geliştirmek olmadığından bu konuya odaklanılmadan yalnızca yüzeydeki tepki kuvveti dağılımı esas alınmıştır. Her model, içerdiği kafes yapıya ait tasarım farklılığı sebebiyle değişik şekillerde tepki kuvveti dağılımına sahiptir



Şekil 16. Yer değiştirme miktarları

Model 2, 4, 5, 16, 18 ve 22 büyüklük olarak farklı olsa da yüzey üzerinde eşit tepki kuvveti

dağılımına sahip modellerdir. Yük geniş bir yüzeye yayılarak yerel gerilmelerin düşük olmasına yardımcı olmaktadır. Böylece gerilme konsantrasyonu riski en aza indirilerek çatlak oluşumunun önlenmesi ve buna bağlı olarak yorulma ömrünün uzaması beklenmektedir. Özellikle tekrarlı yüklemelere maruz kalan tasarımlar için bu önemli bir durumdur. Konstrüktif açıdan ise, alt yüzey üzerindeki bağlantı elemanları düşünülüğünde yük dağılımı dengeli olduğu için her birine eşit yük etki edeceğinden tasarım hesaplarıyla gerçek davranış daha uyumlu olacak ve tasarımın güvenilirliği açısından olumlu yönde bir katkı sunulmuş olacaktır.

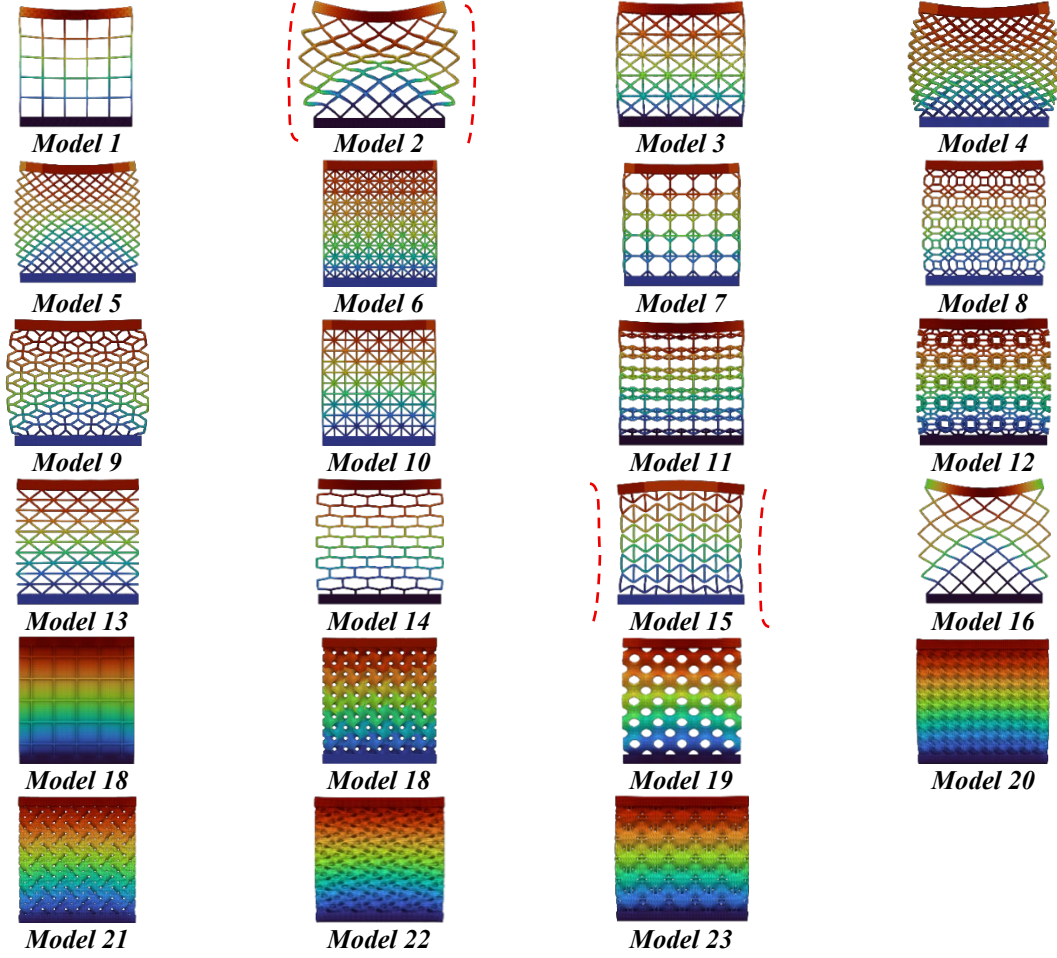
Ayrıca yüzey üzerindeki kuvvet akış yolları fazla olduğundan, tek bir bölgede hasar olması durumunda bile yapının tamamının bundan hemen etkilenmesi önlenecektir. Bu durumda Model 9, 12, 14, 15 ve 19 gibi tasarımların alt yüzeylerindeki tepki dağılımına bakıldığında yükün belirli bölgelerde toplandığı görülmektedir. Bu bölgelerde oluşabilecek yüksek gerilme konsantrasyonu çatlama riskine ve buna bağlı olarak yorulma ömrüne olumsuz yönde etki edebilir. Bununla birlikte, konstrüktif açıdan bu durum yorumlandığında, kuvvetin belirli bölgelerden aktarılması kuvvet akış yolunu kontrol edilebilir hale getirmektedir. Bu sayede, gerilmelerin az olduğu bölgelerden malzeme tasarrufuna gidilebilme imkânı oluşmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen statik ve modal analiz bulguları, farklı kafes geometrilerinin spesifik mühendislik uygulama alanları için ayırt edici avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre; en yüksek rijitlik ve doğal frekans değerlerini sergileyen Lidinoid ve SplitP gibi TPMS yapılarının, yüksek yapısal kararlılık ve dinamik direnç gerektiren havacılık bileşenleri ile türbin kanatçıkları için en uygun adaylar olduğu değerlendirilebilmektedir. Öte yandan, en düşük kütle ile optimize edilmiş bir rijitlik sunan Simple Cubic gibi çubuk tabanlı yapıların, ağırlık hassasiyeti yüksek ancak düşük yükleme profiline sahip insansız hava aracı (İHA) gövde dolgularında kullanımı bu açıdan avantajlıdır. Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olan ve geometrik süreklilikleri sayesinde tüm yapı boyunca kesintisiz bir enerji dağılımı sergileyen Gyroid ve Diamond

yapılarının ise hem mekanik destek hem de yüksek akışkan geçirgenliği beklenen biyomedikal implantlar ve ısı eşanjörü

tasarımları için en verimli geometrik çözümleri sunacağı gözükmetedir.



Şekil 17. Modellerin yer değiştirme davranışları

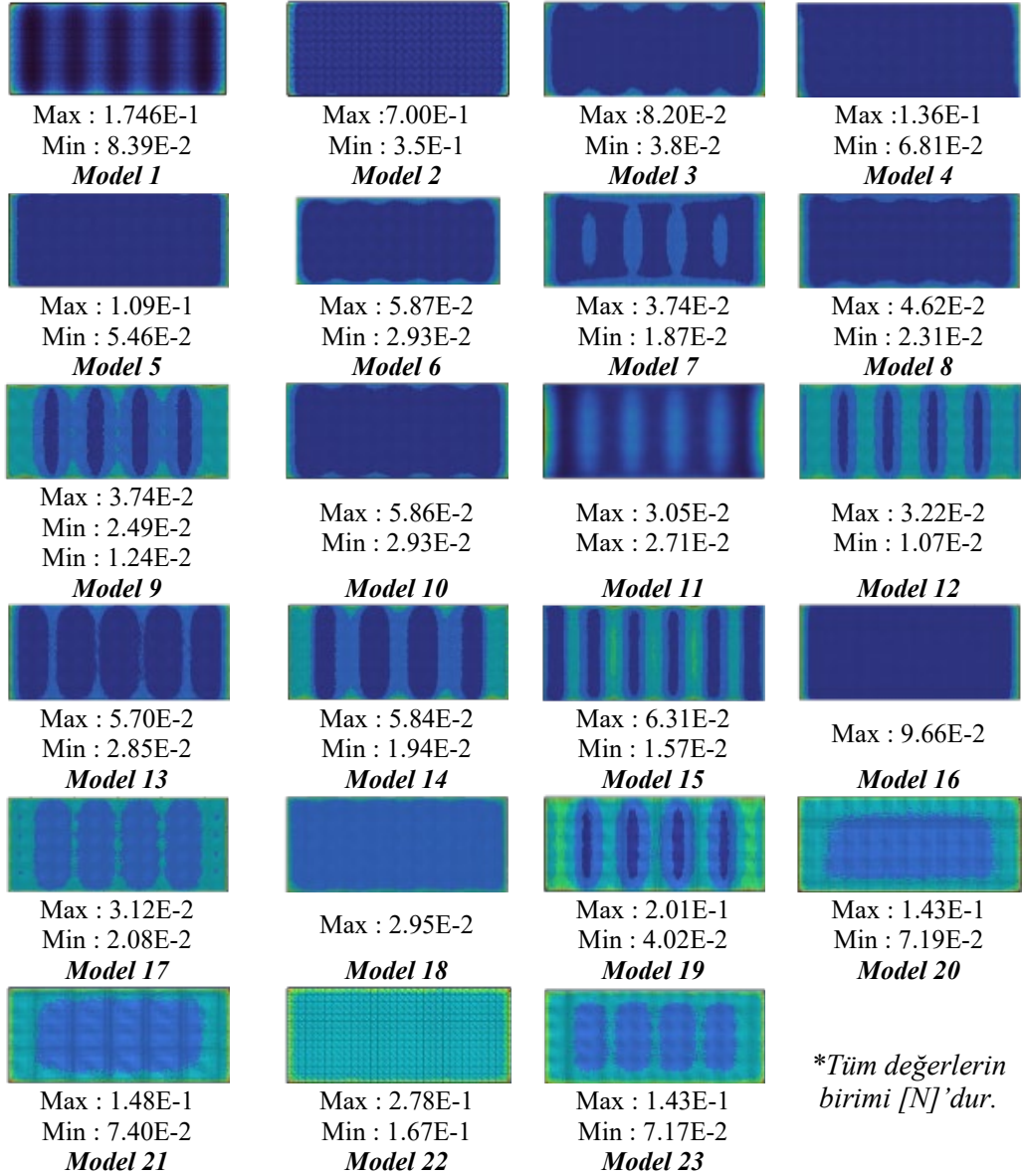
4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile nTop programı kullanılarak sabit bir kontrol hacmi içerisinde yerleştirilmiş farklı kafes yapılar, parametrik olarak modellenerek statik ve modal analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo ve görseller ile açıklanarak yapılar, kütle, katı hacim oranı, rijitlik ve yer değiştirme davranışı gibi kriterler üzerinden sınıflandırılmıştır.

Statik analize göre, düşük kütleli ve düşük katı hacim oranına sahip modeller, daha yüksek yer değiştirme değerleri ile esnek davranış sergilemişlerdir. Bu tür yapıların, hafiflik ve belirli düzeyde esneklik gerektiren uygulamalar için uygun olduğu görülmektedir. Yüksek kütle ve katı hacim oranına sahip modeller, çok düşük yer değiştirme ile yüksek rijitlik ve dayanıklılık göstermiştir. Bu açıdan bu modellerin özellikle rijitlik ve stabilitenin kritik olduğu uygulamalar

için avantaj sağlayabileceği söylenebilmektedir.

Orta düzey kütle ve katı hacim oranına sahip modeller ise, dengeli deformasyon davranışı sunmuş, hafiflik ve rijitlik arasında optimum bir çözüm ortaya koymuşlardır. Özel bir durum olarak, yalnızca Model 11'in özetik davranış sergilemesi, bu modelin diğer kafes yapılarından farkını ortaya koymaktadır. Enerji sönmüleme ve darbe dayanımı açısından daha iyi mekanik performans veren bu özellik sayesinde bu tarz yapıların tercih edildiği bilinmektedir. Modal analiz sonuçlarına göre, ilk modların çoğunlukla eğilme modları (X/Y) olduğu görülmüştür. Bu modlar yapının temel esneklik modlarıdır. Burulma ve uzama/öteleme modları ise, yapıların torsiyonel ve aksenal rijitliğini ortaya koymuş ve daha yüksek frekanslarda gözlenmiştir. Doğal frekans değerleri ile kütle ve katı hacim oranı arasında doğrudan bir ilişki mevcuttur.



Şekil 18. Alt yüzey tepki kuvvetleri etki alanları

Düşük kütleli yapılar 100–200 Hz aralığında daha esnek bir davranış sergilerken, yüksek kütleli yapılar 4000 Hz'in üzerine çıkabilen yüksek frekanslarla rijit davranış göstermiştir. Tepki kuvveti dağılımlarının analizi ise, yükün alt yüzeyde geniş alana eşit dağılması durumunda gerilme konsantrasyonunun azaldığını göstermiştir. Buna karşılık, yükün belirli bölgelerde toplandığı modellerde gerilme yoğunlaşması riski artmakla birlikte, kuvvet akış yollarının kontrol edilebilir olması sayesinde malzeme tasarrufu açısından avantaj sağlanabilmektedir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, kafes yapıların seçiminin uygulamanın önceliklerine göre yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Hafiflik ve esneklik odaklı uygulamalarda

düşük kütleli kafesler, rijitlik ve dayanıklılık odaklı uygulamalarda yüksek katı hacim oranına sahip kafesler, enerji emilimi veya özel mekanik davranış gerektiren tasarımlarda ise özkütelik yapılar sahip kafesler tercih edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, tasarım aşamasında araştırmacılara kütle–rijitlik–yer değiştirme davranışı ilişkilerini dikkate alarak kafes tipi seçiminde yol gösterici kriterler sunmaktadır. Ayrıca, nTop programının parametrik ve fonksiyon tabanlı yaklaşımı sayesinde elde edilen tasarım süreçlerinin tekrar kullanılabilir ve otomatikleştirilebilir olması, gelecekte farklı malzeme ve üretim yöntemleriyle yapılacak çalışmalara altyapı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Pan, C., Han, Y., Lu, J., “Design and optimization of lattice structures: a review”, *Applied Sciences* Vol.2020, Issue 10, Pages 1–36.
2. nTop “Guide-to-lattice Structures in Additive Manufacturing”, <https://www.ntop.com/resources/blog/guide-to-lattice-structures-in-additive-manufacturing/>, Eylül 9, 2025.
3. Gibson, L.J., “Modelling the mechanical behavior of cellular materials”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 110, Pages 1-36, 1989.
4. Evans, A.G., “Lightweight materials and structures”, *MRS Bulletin*, Vol. 26, Pages 790-797, 2001.
5. Al-Ketan O, Abu Al-Rub R.K., “Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices.” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 21, Issue 10., 2019.
6. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., “Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 51, Pages 61-73, 2015.
7. Qi, C., Jiang, F., Yang, S., “Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 227, 2021.
8. Wenjin, Tao., Ming, C. Leu., “Design of lattice structure for additive manufacturing”, *Proceedings of ISFA2016 2016 International Symposium on Flexible Automation*, Cleveland, Ohio: 2016.
9. Ha, C.S., Plesha, M.E., Lakes, R.S., Yousefi, A., Jolaiy, S., Lalegani, Dezaki M., “Design and mechanical characteristics of auxetic metamaterial with tunable stiffness”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 223, Issue 15, Pages 59–65, 2022.
10. Kumar, A., Collini, L., Daurel, A., Jeng, J.Y., “Design and additive manufacturing of closed cells from supportless lattice structure”, *Additive Manufacturing*, Vol. 33, 2020.
11. Nguyen, D.S., Vignat, F., “A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing”, *IEEM2016: 2016 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management : 4-7 December 2016, Bali, Indonesia*.
12. Wang, Y., Zhang, L., Daynes, S., Zhang, H., Feih, S., Wang, M.Y., “Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive Manufacturing” *Materials and Design*, Vol. 142, Pages 114–23, 2018.
13. Du, Y., Gu, D., Xi, L., Dai, D., Gao, T., Zhu, J., et al. “Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: Forming quality, microstructure and energy absorption behavior”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol.773,2020.
14. Liu, Y., “Mechanical properties of a new type of plate–lattice structures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 192, 2021.
15. Liu, R., Chen, W., Zhao, J., “A review on factors affecting the mechanical properties of additively-manufactured lattice structures”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 33, Pages 4685–711, 2024.
16. Alkhatib, S.E., Karrech, A., Sercombe, T.B., “Isotropic energy absorption of topology optimized lattice structure”, *Thin-Walled Structures*, Vol.182., 2023.
17. Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., Wen, G., “Review on lattice structures for energy absorption properties”, *Composite Structures* Vol. 304, 2023.
18. Campell, I., Wohlers, T., “AM Yields New Breeds of Bikes”, <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/applications/other/am-yields-new-breeds-of-bikes>, Eylül 10, 2025.
19. Wang, C.Y., Li, Y., Zhao, W.Z., Zou, S.C., Zhou, G., Wang, Y.L., “Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 138–139, Pages 489–501, 2018.
20. Jensen, S., “Take air out of the Picture”, <https://www.oemoffhighway.com/drivetrains/article/10446920/resilient-technologies-airless-tire>, Eylül 10, 2025.
21. Rapid 3D., “Classic car meets 3D printing technology”, <https://Rapid3dCoZa/Classic-Car-Meets-3d-Printing-Technology/>, Eylül 10, 2025.
22. Spadoni, A., Ruzzene, M., “Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils”, *Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 2. 2007.

23. Morgan, T.A., “3D-printed lattice structure absorbs vibrations and provides support”, <https://www.eurekamagazine.co.uk/content/news/3d-printed-lattice-structure-absorbs-vibrations-and-provides-support>, Eylül 10, 2025.
24. Mehta, Jatan, “Structural evolution of the TeamIndus spacecraft that will land on the Moon”, <https://MediumCom/Teamindus/Structural-Evolution-of-the-Teamindus-Spacecraft-That-Will-Land-on-the-Moon-B5aa6bc73ccc>, Eylül 10, 2025.
25. Khosroshahi, S.F., Tsampas, S.A., Galvanetto, U., “Feasibility study on the use of a hierarchical lattice architecture for helmet liners”, *Materials Today Communications*, Vol. 14, Pages 312-323, 2018.
26. Acanfora, V., Castaldo, R., Riccio, A., “On the effects of core microstructure on energy absorbing capabilities of sandwich panels intended for additive manufacturing”, *Materials*, Vol. 15, Issue 4, 2022.
27. Acanfora, V., Saputo, S., Russo, A., Riccio, A., “A feasibility study on additive manufactured hybrid metal/composite shock absorbers”, *Composite Structures*, Vol. 268, 2021.
28. Feng, J., Liu, B., Lin, Z., Fu, J., “Isotropic octet-truss lattice structure design and anisotropy control strategies for implant application”, *Materials Design*, Vol. 203, 2021.
29. Digital Light Synthesis, “Carbon Lattice Innovation — The adidas Story”, <https://www.carbon3d.com/resources/whitepaper/the-adidas-story>, Eylül 10, 2025.
30. Gunaydin, K., Gülcan, O., Tamer, A., “Application of homogenization method in free vibration of multi-material auxetic metamaterials”, *Vibration*, Vol. 8, 2025.
31. Avitabile, P., “Introduction to experimental modal analysis: a simple non-mathematical presentation”, *Modal Testing: A Practitioner’s Guide*, 2017.
32. De Silva, C.W., “Modal analysis. vibration and shock handbook”, CRC Press, 2005.
33. Kelly, S.G., “Mechanical vibrations theory and applications. cengage learning”, Cengage Learning EMEA, 2012.
34. Kenan, H., Özen, M., Azeloğlu, C.O., “Investigating the impact of functional grading on mechanical performance for auxetic structures”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025.
35. İhsan Burak, Yeter, Hamit, Kenan, C. Oktay, Azeloglu, “Kafes geometriye sahip sandviç bir yapının mekanik özelliklerinin deneysel ve sayısal analizi”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Vol. 32, Issue 1, Pages 23-34, 2026.
36. Patır, A.S., Ceylan, O.B., Sarı, B., Kenan, H., Şen, İ., “Re-entrant Chiral Auxetic: An Optimal Lightweight Design and Enhanced Performance for Aerospace Structural Parts”, *Digitalization in Additive Manufacturing Springer Nature Switzerland*, Pages 715–729, 2025.
37. Sarı, B., Ceylan, O.B., Patır, A.S., Kenan, H., Şen, İ., “Revolutionizing Airfoils: Utilizing Auxetic Metamaterials and Additive Manufacturing for Enhanced Performance”, *Digitalization in Additive Manufacturing Springer Nature Switzerland*, Pages 335–358, 2025.